

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160981

李萍, 郝兴宇, 宗毓铮, 古润生, 贾绍辉, 董琦, 郭李萍. 不同耕作措施对雨养冬小麦碳足迹的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 839–847  
Li P, Hao X Y, Zong Y Z, Gu R S, Jia S H, Dong Q, Guo L P. Effect of tillage practice on carbon footprint of rainfed winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 839–847

## 不同耕作措施对雨养冬小麦碳足迹的影响<sup>\*</sup>

李萍<sup>1,2</sup>, 郝兴宇<sup>1</sup>, 宗毓铮<sup>1</sup>, 古润生<sup>3</sup>, 贾绍辉<sup>3</sup>, 董琦<sup>1</sup>, 郭李萍<sup>2\*\*</sup>

(1. 山西农业大学农学院 太谷 030801; 2. 中国农业科学院农业与环境可持续发展研究所 北京 100081;  
3. 山西临汾市农机局 临汾 041000)

**摘要:** 为了解不同耕作管理措施对我国北方旱作农田作物生产生命周期内生产资料及生产过程碳排放足迹的影响, 在山西省临汾市尧都区连续15年保护性耕作长期定位试验基地, 利用静态箱-气相色谱法连续两年测定了不同秸秆管理和耕作措施(秸秆不还田旋耕、秸秆还田旋耕、秸秆覆盖免耕)下, 旱作冬小麦田  $N_2O$  周年排放通量, 并对不同耕作管理措施的生产资料和生产过程中的碳排放进行全面分析与计算, 以估算不同耕作措施的碳足迹。结果表明: 1) 秸秆覆盖免耕和秸秆不还田旋耕条件下旱作冬小麦田  $N_2O$  年度累积排放量较秸秆还田旋耕分别平均减少19.2%和18.9%; 2) 旱作冬小麦在秸秆覆盖免耕条件下产量最高; 3) 旱作农田碳足迹中氮肥生产、农田  $N_2O$  直接排放和柴油消耗排放占到总排放足迹的90%以上; 4) 秸秆覆盖免耕较其他耕作方式的碳足迹低, 两年试验期间, 较秸秆还田旋耕处理碳足迹分别低11.0%和6.9%, 较秸秆不还田旋耕处理碳足迹分别低7.9%和8.3%。5) 在半干旱地区, 秸秆覆盖免耕处理单位产量碳足迹最低, 是本研究中低碳低排的推荐措施。本研究结果可为旱作农田以低碳减排为目标的可持续发展提供科学依据。

**关键词:** 秸秆还田; 免耕; 旱作小麦;  $N_2O$  排放; 碳足迹

中图分类号: S512.1; P467 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2017)06-0839-09

## Effect of tillage practice on carbon footprint of rainfed winter wheat<sup>\*</sup>

LI Ping<sup>1,2</sup>, HAO Xingyu<sup>1</sup>, ZONG Yuzheng<sup>1</sup>, GU Runsheng<sup>3</sup>, JIA Shaohui<sup>3</sup>, DONG Qi<sup>1</sup>, GUO Liping<sup>2\*\*</sup>

(1. Agricultural College, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Agricultural Bureau of Linfen of Shanxi Province, Linfen 041000, China)

**Abstract:** It is crucial to mitigate greenhouse gas emissions from soil and to abate carbon emissions from the production of goods (e.g., fertilizers, seeds, etc.) and production processes (e.g., diesel consumption by machines) for sustainable agricultural production. In order to evaluate carbon footprint and carbon emission intensity of different tillage practices in rainfed field, a 15-year long-term experiment with three different tillage practices was conducted in Linfen, Shanxi Province, a typical semi-arid area in North China. The investigated tillage management practices were rotary tillage without straw incorporation (RT), straw incorporation and rotary tillage (SRT) and straw-mulch and no-tillage (SNT). Carbon footprint in the production

\* 国家科技支撑计划项目(2013BAD11B03, 2015BAD23B00)、国家自然科学基金项目(31601212, 31501276)、山西省科技攻关计划项目(20150311006-2, 20140311011-7)和山西农业大学博士引进人才项目资助

\*\* 通讯作者: 郭李萍, 主要从事土壤碳氮循环与气候变化研究。E-mail: guolp@ami.ac.cn

李萍, 主要从事农业气象和植物生理生态研究。E-mail: lipinghxy@126.com

收稿日期: 2016-11-03 接受日期: 2016-12-16

\* This work was supported by the National Key Technology R&D Program of China (2013BAD11B03, 2015BAD23B00), the National Natural Science Foundation of China (31601212, 31501276), the Key Science and Technology Program of Shanxi Province, China (20150311006-2, 20140311011-7), and Shanxi Agricultural University Doctor Introduce Talents Projects.

\*\* Corresponding author, E-mail: guolp@ami.ac.cn

Received Nov. 3, 2016; accepted Dec. 16, 2016

life-cycle of different tillage practice of rainfed winter wheat was explored, in which  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from field were measured using the static chamber-gas chromatography method and the other emissions calculated by analyzing emissions from the production of main goods and the associated processes during life-cycle period of winter wheat. The results showed that  $\text{N}_2\text{O}$  emissions under SNT and RT management practices were 19.2% and 18.9% lower than that under SRT practice, respectively.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions mainly occurred during the period from booting to maturity and then the period of summer fallow when soil temperature and moisture were most appropriate.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions derived directly from nitrogen fertilizer and carbon emissions from the processes of chemical fertilizer production explained the most share of carbon footprint in the life-cycle of rainfed winter wheat, accounting for 21.6% and 46.4% of the total carbon footprints, respectively.  $\text{N}_2\text{O}$  emissions and carbon emissions derived from nitrogen fertilizer production and diesel consumption, and direct emission for field accounted for over 90% of the carbon footprint of rainfed winter wheat system. Carbon footprint under SNT practice was the lowest among three treatments, it was respectively 7.9%–11.0% and 6.9%–8.3% lower than those under SRT and RT. SNT management practice had the lowest carbon footprint among three tillage practices. Thus, straw incorporation with no-tillage was the most appropriate practice for sustainable agricultural production aimed at low greenhouse gas emissions and low carbon consumption in the semi-arid area of North China.

**Keywords:** Straw incorporation; No-tillage; Rainfed wheat;  $\text{N}_2\text{O}$  emission; Carbon footprint

$\text{N}_2\text{O}$ 是主要的农业源温室气体之一<sup>[1]</sup>, 其增温效应在百年时间尺度上是 $\text{CO}_2$ 的298倍, 对全球大气温室效应的贡献为5%<sup>[1]</sup>。农业活动是除能源和工业活动外最重要的人为温室气体排放源, 占全球人为排放总量的10%~12%<sup>[2]</sup>。据估计, 大气中每年约90%的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放来源于土壤, 农田土壤对大气 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放贡献巨大<sup>[3-4]</sup>。关注农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放特征和影响因子并探寻相应的减排措施, 能为减缓全球气候变化及实现农业可持续发展提供重要支持。

碳足迹(carbon footprint)是从生命周期的角度出发, 某种活动引起的(或某种产品生命周期内积累的)直接或间接的 $\text{CO}_2$ 排放当量的度量<sup>[5-7]</sup>, 是衡量某种生产活动对大气温室效应贡献的研究方法, 并逐渐成为低碳农业研究的另一个分析角度<sup>[7-9]</sup>。

冬小麦(*Triticum aestivum* L.)是我国主要粮食作物之一。北方旱区面积较大, 旱作农业是该区域主要的生产方式<sup>[10]</sup>。旱地不合理施用氮肥是向大气排放 $\text{N}_2\text{O}$ 的重要排放源<sup>[11]</sup>。虽然旱地是一个弱的 $\text{CH}_4$ 汇, 但由于其量值比较低, 在各国的温室气体清单中一般都不予单独计算。此外, 目前联合国气候变化框架公约(UNFCCC)要求各国提供的温室气体清单中, 农业和森林活动的温室气体排放中, 仅土地利用变化(如毁林等活动)引起的 $\text{CO}_2$ 排放计入温室气体清单中, 管理农田的 $\text{CO}_2$ 排放也暂未被列入温室气体清单<sup>[1]</sup>。因此, 对旱地农业生态系统来讲, 氮肥施用引起的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放和耕作、播种、收获等过程中的机械耗油排放和生产过程中各种生产资料在生产过程中的排放即是农产品生产全过程的全部碳排放足迹。我国水资源严重不足, 农业灌溉占国家水资源消耗的55.7%, 占农业用水的91%<sup>[12]</sup>, 土壤水分不足和土壤有机碳

投入不足是半干旱地区农业生产中亟待解决的主要问题。农作物副产品——秸秆用于还田是增加碳输入土壤的简单有效办法, 可在一定程度上遏制土壤有机碳(SOC)下降的趋势, 且合理利用秸秆覆盖的免耕或少耕技术在减少土壤水分损失和作物增产方面多有报道<sup>[10,13-16]</sup>。但不同的耕作管理措施对旱地土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及碳足迹的综合影响还鲜有全面的报道, 国内外学者报道的少免耕对农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放的影响有增加和减少两种不同的结论<sup>[17]</sup>。我国学者针对不同管理措施下华北高产农田温室气体的综合增温潜式也进行了相关研究<sup>[18]</sup>, 并考虑了每项农事活动如机械燃油、灌溉耗电量、施肥量等因素的碳排放<sup>[19]</sup>。但我国半干旱地区土壤水分状况与华北高产区差异较大, 不同耕作措施对农田 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及农业生产资料及生产过程全链条的碳足迹影响具有不同的特点, 本研究即以此为切入点, 科学评价不同耕作管理措施对半干旱区旱作农田冬小麦碳足迹及碳排放强度的影响。本文在山西临汾17年长期定位试验地开展相关试验, 对不同耕作管理方式下旱作冬麦田连续2年的 $\text{N}_2\text{O}$ 排放进行监测, 并对冬麦田生产过程中耕作机械耗油及全部生产资料全链条碳排放估算, 评价不同耕作管理措施的碳足迹及碳排放强度, 旨在为半干旱地区旱作农业生产系统温室气体减排和农业可持续生产提供数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

田间试验点位于山西省临汾市尧都区县底镇城隍村(111°30'N, 36°04'E)保护性耕作固定道长期定位试验地, 该地为拖拉机和其他作业机械长期行走的一

条固定车道, 每个车道宽30 cm, 车道不耕作也不种植作物, 车道之间宽150 cm, 种植小麦6行, 小麦行距20 cm, 作物生长带不受车轮压实<sup>[20]</sup>。该长期定位试验开始于1997年, 到2012年已进行15年, 是目前亚洲最早建立的固定道免耕试验, 对监测长期不同耕作管理对作物与土壤的各种影响有重要意义。试验区域属温带大陆性气候, 年均气温12.6 °C, 年均降雨量527 mm, 无霜期约190 d。试验地为旱地褐土。种植制度为一年1作冬小麦, 旱作无灌溉。2011年播种冬小麦品种为‘临汾227’, 2012—2014年两季冬小麦品种均为‘长6359’。

## 1.2 试验设计及田间管理

本试验共设秸秆不还田旋耕(当地农民常规耕作方式, 简称 RT)、秸秆还田旋耕(简称 SRT)和秸秆覆盖免耕(简称 SNT)3个处理。原长期定位试验只设 SRT 和 SNT 两个试验处理, 其中 SNT 为固定道免耕处理, 但原试验未设重复(耕作方便), SRT 和 SNT 处理区面积分别约 0.13 hm<sup>2</sup>, 本试验分别在原 SRT 和 SNT 处理区内设置 3 个面积 30 m<sup>2</sup> 的取样小区作为重复。另外, 本研究在原试验地中秸秆未还

田的保护行地带(其他操作均相同, 只有秸秆未还田)增加取样小区和重复, 作为秸秆不还田旋耕操作的常规对照(RT), 以研究不同耕作管理措施的效应。

RT 处理, 小麦机收后秸秆全部清除移出, 之后在小麦播前旋耕播种。SRT 处理在小麦机收后直接将秸秆粉(粉碎长度为 15~20 cm)撒于地表, 之后在小麦播前旋耕播种。SNT 处理在小麦机收时留高茬(约 30 cm), 其余秸秆粉碎撒于地表, 之后到 9 月底直接用免耕播种机播种下一季小麦, 播前再无其他土壤耕作。各处理均采用硝酸磷肥复合肥(氮磷含量分别为含 N 25% 和含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)做底肥一次施入, 复合肥施用量 450 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 即施氮量 112.5 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 施磷量 123.7 kg(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)·hm<sup>-2</sup>。施肥日期: 2012 年为 9 月 24 日、2013 年为 9 月 26 日, 播种与施肥同步进行。收获日期: 2013 年为 6 月 13 日, 2014 年为 6 月 15 日。

## 1.3 试验地土壤特性

于 2012 年 9 月 23 日选取各处理 0~20 cm 土壤进行物理化学性状分析, 土壤质地为轻壤, 其他理化性状见表 1。

表 1 不同耕作方式试验地的土壤理化性状  
Table 1 Physical and chemical properties of the experiment soil under different tillage practices

处理 Treatment	耕作方式 Tillage practice	有机质 Organic matter (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Total N (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkaline hydrolysis N (mg·kg <sup>-1</sup> )	土壤容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	
					0~10 cm	10~20 cm
秸秆不还田旋耕						
RT	Rotary tillage without straw incorporation	12.70±0.81	0.72±0.01	27.47±0.85	1.28±0.32	1.32±0.24
秸秆还田旋耕						
SRT	Rotary tillage with straw incorporation	12.20±0.06	0.69±0.03	25.59±0.57	1.28±0.32	1.32±0.24
秸秆覆盖免耕						
SNT	No tillage with straw mulching	14.12±0.43	0.74±0.04	28.59±0.70	1.12±0.46	1.54±0.53

## 1.4 试验期间降水量

2012 年 9 月—2013 年 9 月降水量为 593.7 mm, 小麦生长季降水量为 180.6 mm。2013 年 9 月—2014 年 9 月降水量为 731.6 mm, 小麦生长季降水量为 283.5 mm(图 1)。降水主要集中在小麦休闲期 7—9 月。

## 1.5 样品采集

N<sub>2</sub>O 的测定采用静态箱-气相色谱法, 取样箱为不透明 PVC 材料制成, 取样箱直径 25 cm、高 30 cm, 底座为相同尺寸的 PVC 原环并有凹槽以密封底座与箱。分别在 0 min、10 min、20 min 和 30 min 用注射器抽取经过混匀的气样 35 mL 至 12 mL 真空血清瓶(Labco 公司, 英国)中。采样时间选择在上午 9:00—11:00, 该时段最接近每日平均气温, 可以代表

每日的气体平均排放通量<sup>[18]</sup>。每个试验小区内放置 1 个取样箱, 每个处理共 3 个重复。2012 年 9 月 25 日至 2014 年 9 月 20 日两个年度取气, 一般生育期每 7 d 取样 1 次, 冬季(11 月份到翌年 1 月份)10~20 d 取样 1 次, 施肥和降雨后取样频率加密(每 2 d 取样 1 次, 连续取 3 次), 每次取气样的同时用自制的热敏电阻(误差为±0.5 °C)测定取样箱内温度及土壤 5 cm 处温度。每次取气的同时用便携式土壤水分测定仪(型号 TGS-1, 浙江托普仪器有限公司生产)测定土壤 5 cm 处的体积含水量。降水量采用自动雨量器测定。血清瓶取回后在 1 周内用气相色谱仪(Agilent 7890B)测定 N<sub>2</sub>O 浓度, 按照浓度变化率差及静态箱体积计算气体排放通量。

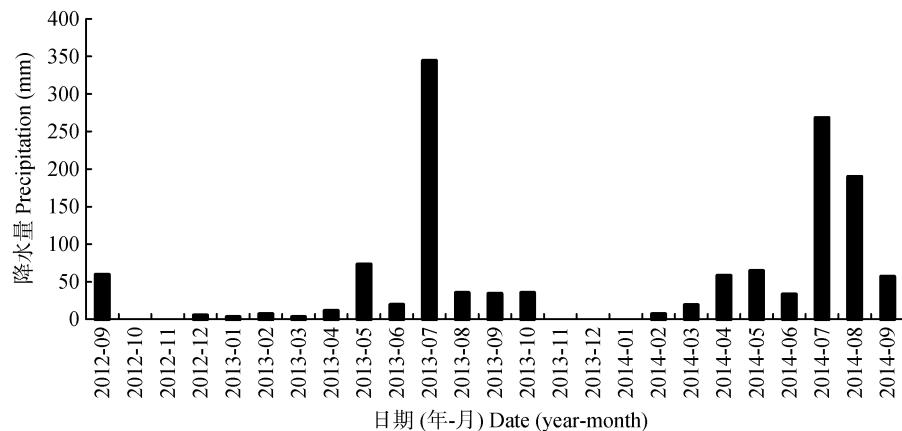


图 1 2012 年 9 月—2014 年 9 月试验期间试验地降水量

Fig. 1 Precipitation at the experimental field during the experiment period from Sep. 2012 to Sep. 2014

## 1.6 样品测定与计算

$\text{N}_2\text{O}$  气体样品分析采用 Agilent 7890B 气相色谱仪, 检测器为电子捕获检测器(electron capture detector, ECD), 工作温度为 330 °C, 分析柱为 Porpak.Q 填充柱, 柱箱温度为 70 °C, 载气为纯  $\text{N}_2$ , 流量为 25  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。气相色谱  $\text{N}_2\text{O}$  的检测精度为  $\pm 5.5 \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

$\text{N}_2\text{O}$  排放通量的计算公式为:

$$F = \rho \times H \times k \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中:  $F$  为  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $\rho$  为某  $\text{N}_2\text{O}$  气体标准状态(0 °C 和 100 kPa)下的密度( $1.96 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ),  $H$  为取样箱高度(m),  $k$  为取样时间内静态箱内的  $\text{N}_2\text{O}$  气体浓度变化率( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $T$  为测定时箱体内的平均温度(°C)。

## 1.7 碳足迹计算

本研究中综合温室效应的分析采取碳足迹分析方法。利用Brentrup等<sup>[21]</sup>建立的生命周期评价方法(LCA)对碳足迹计算, 该方法包括原材料的采集、相关农资的生产和农作生产3个环节, 该方法能够对农作生产过程及产生的温室气体排放进行系统、全面地分析。计算公式如下:

$$f_C = \sum_{i=1}^n f_{Ci} = \sum_{i=1}^n m_i \times \beta_i \quad (2)$$

式中:  $f_C$  为农业生产碳足迹,  $n$  表示农业生产过程中消耗了  $n$  种物质(能源或生产资料等),  $f_{Ci}$  为第  $i$  种物质的碳足迹,  $m_i$  为第  $i$  种物质的消耗量,  $\beta_i$  为第  $i$  种物质的碳排放系数。碳足迹以排放的  $\text{CO}_2$  当量 [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})$ ],  $\text{N}_2\text{O}$  排放量需乘以 298 折算成  $\text{CO}_2$  当量]计算, 其单位为  $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ <sup>[21]</sup>。

本研究中涉及的农资或活动的碳排放系数见表2。

$$\text{单位产量排放量} = \text{单位面积碳足迹}/\text{单位面积小麦产量} \quad (3)$$

表 2 雨养冬小麦栽培所用农资材料在生产过程的碳排放系数

Table 2 Carbon emission factors of agricultural production goods for rainfed winter wheat cultivation

项目 Item	碳排放系数 Carbon emission factor	参考文献 Reference
氮肥生产 N fertilizer production [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{kg}^{-1}(\text{N})$ ]	1.74	[22]
磷肥生产 P fertilizer production [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{kg}^{-1}(\text{P}_2\text{O}_5)$ ]	0.20	[23]
除草剂生产 Weedicide production [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	6.30	[23]
柴油油耗 Diesel consumption [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{L}^{-1}$ ]	0.94	[23]
小麦种子生产 Wheat seed [ $\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e})\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	0.11	[23]

## 1.8 数据处理

用 Microsoft Excel 2007 进行图表制作。利用 SAS 8.0 软件进行数据统计分析, 采用方差分析比较不同处理的差异性, 显著水平设定为  $\alpha=0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作管理措施下土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放特征

因该区降水主要集中在夏季, 夏季土壤湿度、温度均较高。2014 年春季土壤含水量较 2013 年平均高 6.4%(图 2a), 而 2013 年夏季土壤温度较 2014 年平均高 5.7 °C(图 2b)。夏季(6—8 月份)秸秆覆盖免耕(SNT)处理 5 cm 土壤温度比秸秆还田旋耕(SRT)低 0.54 °C, 比秸秆不还田(RT)处理高 0.42 °C(图 2b)。SNT 处理春季表层土壤湿度分别比 RT 和 SRT 处理高 3.5% 和 1.7%(图 2a)。SRT 处理的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量总体较 SNT 处理高(平均高约 22.2%), 尤其是在 2013 年小麦返青期后到秋季播种期间更为明显(图 2c)。

RT和SNT处理的N<sub>2</sub>O排放总量较SRT低, 两年平均排放量分别比SRT低19.2%和18.9%, 2013年减排量更高, 分别较SRT减排26.0%和25.6%。除RT处理的N<sub>2</sub>O排放量与土壤水分含量没有显著相关外, 其他耕

作方式的N<sub>2</sub>O排放通量与土壤温度和土壤水分含量均呈显著正相关, 但与土壤5 cm处温度的相关性更高(表3), 2014年降水量高, 土壤温度较2013年低, 这也是2014年N<sub>2</sub>O排放量较2013年低的可能原因。

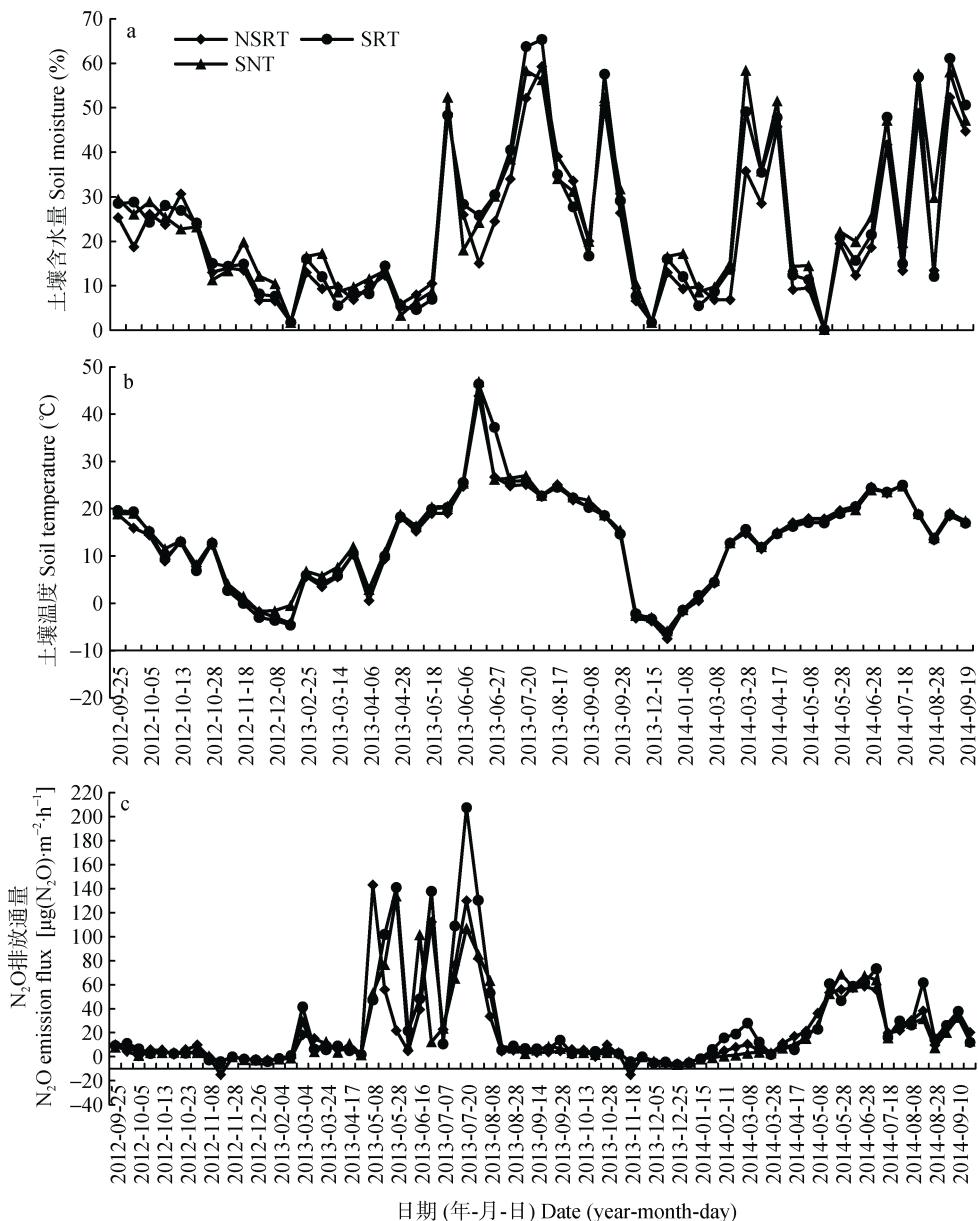


图2 不同耕作方式下5 cm土壤水分含量(a)、5 cm土壤温度(b)及土壤N<sub>2</sub>O排放通量(c)周年变化情况

Fig 2 Annual variations of soil moisture at 5 cm depth (a), soil temperature at 5 cm depth (b) and N<sub>2</sub>O emission fluxes (c) for different tillage practices during the experimental period

表3 不同耕作条件下土壤N<sub>2</sub>O周年排放量及其与土壤温度、水分的相关性

Table 3 Cumulative N<sub>2</sub>O emissions of different tillage practices and their correlations with soil temperature and soil moisture

耕作方式 Tillage practice	N <sub>2</sub> O排放量 [kg(N <sub>2</sub> O-N)·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ]			平均排放量与5 cm土温的相关系数 Correlation coefficient between mean emission and soil temperature at 5 cm depth	平均排放量与土壤水分的相关系数 Correlation coefficient mean emis- sion and soil moisture
	2012—2013	2013—2014	平均 Mean		
RT	1.17b	0.91ab	1.05b	0.507 8 <sup>**</sup>	0.253 4
SRT	1.59a	1.03a	1.30a	0.535 4 <sup>**</sup>	0.422 7 <sup>**</sup>
SNT	1.18b	0.87bc	1.05b	0.606 5 <sup>**</sup>	0.387 7 <sup>**</sup>

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ ), \*\*表示相关性极显著( $P<0.01$ )。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ), \*\* indicate significant correlation ( $P < 0.01$ )。

## 2.2 不同耕作方式的碳足迹

各处理从播种到收获过程中构成冬小麦碳足迹的因素见表 4, 其中  $N_2O$  排放以外的因素对碳足迹的贡献每年大致相同, 而  $N_2O$  田间排放对碳足迹的贡献因每年气候因素的不同而有相应的变化, 单位质量  $N_2O$  的温室效应对碳足迹的贡献按照同等质量  $CO_2$  的 298 倍计算。计算每年冬小麦生产过程中各处理的碳足迹数值(表 4)显示, RT、SRT 和 SNT 处理两年碳足迹分别为 490.3  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 、507.5  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ ,

451.5  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 、465.9  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$  和 458.7  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 、427.1  $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 。各部分碳足迹占总碳足迹的比例排序各处理均为化肥生产(平均 46.4%)>农田  $N_2O$  排放(平均 21.6%)>耕作播种柴油消耗排放(平均 25.2%)>种子生产排放(平均 4.4%)>农药生产和使用排放(平均 2.4%)。农田  $N_2O$  排放、氮肥生产造成的排放和柴油消耗排放占总排放的 90%以上, 这 3 个因素是最主要的碳足迹贡献因素。而种子生产和农药生产所造成的碳足迹所占比例均小于 5%。

表 4 不同耕作管理下冬小麦栽培碳足迹构成

Table 4 Sources and compositions of carbon footprint of winter wheat cultivation under different tillage practices

项目 Item		实物量 Amount			碳足迹 Carbon footprint [ $kg(CO_2\cdot e)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ ]		
		RT	SRT	SNT	RT	SRT	SNT
化肥生产 Chemical fertilizer production	氮肥 N fertilizer	112.5 $kg(N)\cdot a^{-1}$	112.5 $kg(N)\cdot a^{-1}$	112.5 $kg(N)\cdot a^{-1}$	195.8	195.8	195.8
	磷肥 P fertilizer	123.7 $kg(P_2O_5)\cdot a^{-1}$	123.7 $kg(P_2O_5)\cdot a^{-1}$	123.7 $kg(P_2O_5)\cdot a^{-1}$	24.7	24.7	24.7
除草剂生产 Weedicide production		1.5 $kg\cdot a^{-1}$	1.5 $kg\cdot a^{-1}$	2.25 $kg\cdot a^{-1}$	9.5	9.5	14.2
柴油消耗 Diesel consumption	旋耕 Rotary tillage	45 $L\cdot a^{-1}$	45 $L\cdot a^{-1}$	0.0 $L\cdot a^{-1}$	42.3	42.3	0.0
	播种 Seeding	30 $L\cdot a^{-1}$	30 $L\cdot a^{-1}$	45 $L\cdot a^{-1}$	28.2	28.2	42.3
秸秆移除 Straw removal		16 $L\cdot a^{-1}$	0.0 $L\cdot a^{-1}$	0.0 $L\cdot a^{-1}$	15.3	0.0	0.0
收获 Harvesting		60 $L\cdot a^{-1}$	60 $L\cdot a^{-1}$	60 $L\cdot a^{-1}$	56.4	56.4	56.4
种子 Seed	播种量 Seeding rate	187.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	187.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	187.5 $kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	20.6	20.6	20.6
$N_2O$ 排放 $N_2O$ emission	2012—2013	1.2 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	1.6 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	1.2 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	97.5	130.0	97.5
	2013—2014	0.9 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	1.0 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	0.9 $kg(N)\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$	73.1	81.3	73.1

碳足迹估算表明: SNT 较其他耕作方式碳足迹低, SNT 处理较 SRT 处理碳足迹两年分别降低 11.0% 和 6.9%。SNT 处理较 RT 处理碳足迹两年分别降低 7.9% 和 8.3%, SNT 是旱作小麦田有效减排的耕作管理方式。相对于 RT, SNT 主要是减少了耕作柴油消耗(减排量占到 6% 以上), 而相对于 SRT 处理 SNT 因  $N_2O$  排放减少的排放占到减排量的 4% 以上。

## 2.3 不同耕作方式旱作小麦产量

如图 3 所示: SNT 处理可以提高小麦产量, 2013 年和 2014 年分别较 SRT 处理增加 41.7% 和 14.3%。在干旱的 2013 年增幅更高, 两年平均增产幅度为 21.8%。

## 2.4 不同耕作方式下冬小麦碳成本分析

根据不同耕作方式下小麦单位面积产量与碳足迹数值, 计算单位小麦产量的碳排放(表 5)。旱作条件下, SNT 处理产量最高, 碳足迹最低, 故单位产量碳足迹最低。2013 年, SNT 单位产量碳足迹较 RT 和

SRT 分别减少 37.3% 和 37.2%, 2014 年则分别减少 22.3% 和 18.5%。

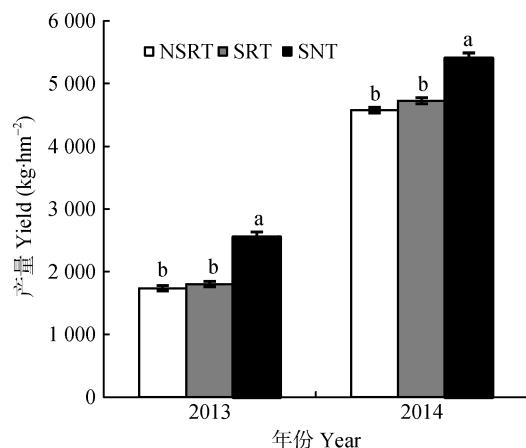


图 3 2012—2013 和 2013—2014 年度不同耕作方式冬小麦产量

Fig. 3 Yields of winter wheat under different tillage practices in 2012—2013 and 2013—2014  
不同字母表示同一年份中不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters in the same year indicate significant differences between treatments ( $P < 0.05$ )。

表5 不同耕作方式冬小麦单位产量的碳足迹  
Table 5 Carbon footprint for per ton winter wheat grains under different tillage practices

年份 Year	耕作方式 Tillage practice	碳足迹 Carbon footprint [kg(CO <sub>2</sub> -e)·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ]	单位产量碳足迹 Carbon footprint per ton grains [kg(CO <sub>2</sub> -e)·t <sup>-1</sup> ]
2013	RT	490.3	282.3
	SRT	507.5	281.9
	SNT	451.5	177.1
2014	RT	465.9	101.8
	SRT	458.7	97.1
	SNT	427.1	79.1

### 3 讨论

#### 3.1 不同耕作措施对旱作小麦田 N<sub>2</sub>O 减排效果分析

农田土壤 N<sub>2</sub>O 的排放主要由土壤微生物参与的氮素硝化-反硝化作用而产生。土壤温度、土壤湿度、土壤矿质氮含量等是影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要环境因子, 不同的耕种方式可以改变土壤温度、湿度和土壤性质, 进而影响 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[24-25]</sup>。秸秆还田有利于增加土壤有机质含量, 并会对土壤物理结构产生影响, 改变土壤微生物的生存环境, 进而对 N<sub>2</sub>O 排放产生影响。秸秆还田增加了土壤的碳供应, 促进了土壤中反硝化作用, 秸秆还田条件下麦田 N<sub>2</sub>O 排放量显著高于无秸秆还田排放量<sup>[26]</sup>。秸秆覆盖免耕可以增加土壤湿度, 改变土壤表面温度, 进而影响 N<sub>2</sub>O 排放。在实施免耕早期, 免耕处理下土壤容重增加, 使表层土壤保水能力增加, 造成土壤厌氧环境, 使表层土壤潜在的反硝化速率增加, 促进土壤 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[27]</sup>。本研究是在长期秸秆覆盖免耕条件下(17年的长期定位试验)进行的, 土壤 N<sub>2</sub>O 排放量较秸秆还田旋耕低(表3), 这与一些干旱半干旱区的研究报道的结果类似<sup>[28-30]</sup>, 但不同于澳大利亚及欧洲、加拿大等地区的一些报道<sup>[17,31]</sup>, 这可能与干旱半干旱区由于土壤水分普遍较低, 土壤体积含水量常年低于 60%, 秸秆还田免耕处理的土壤水分在非雨季略高于旋耕处理、而雨季的土壤含水量差异与其含水量背景值差异较小。此外, 秸秆覆盖免耕还可以降低土壤耕层温度(高温月份表面的秸秆可以起到很好的隔热效果, 降低耕层的土壤温度)。土壤 N<sub>2</sub>O 排放和土壤温度的相关分析也表明, 温度的变化对土壤 N<sub>2</sub>O 排放有着较大的影响。另外, Rochette<sup>[32]</sup>发现免耕能增加通气条件差的土壤 N<sub>2</sub>O 排放, 对通气性好的土壤则影响不大。由于长期固定道免耕种植区土壤没有像传统免耕那样对土壤造成普遍压实, 可以改善土壤孔隙状况, 使表层土壤通气性增加(免耕处理 0~10 cm 土壤容重较旋耕土壤小, 见材料方法部

分), 不利于土壤厌氧环境的形成, 从而减少土壤反硝化速率, 减少了 N<sub>2</sub>O 排放; 本试验土壤属轻壤, 质地较轻, 因此免耕并未造成土壤通气性变差, 因而免耕秸秆覆盖未增加 N<sub>2</sub>O 排放。

#### 3.2 不同耕作措施的综合减排效果

保护性耕作能够减少地表蒸发, 显著改善土壤贮水量及含水量, 在降水较少年份免耕秸秆覆盖的保水作用突出<sup>[16]</sup>。在旱作条件下, 免耕秸秆覆盖有利于土壤水分的保持, 可以提高冬小麦产量。不同耕作措施对旱作冬小麦生产的碳足迹分析表明, 化肥生产和化肥施用后的 N<sub>2</sub>O 直接排放造成的碳排放在总的碳足迹排放所占比例最大, 这主要是由于化肥生产和运输过程中均需要消耗大量的化石燃料, 而我国的粮食生产在很大程度上依赖化肥, 且国内化肥使用量, 特别是氮肥使用量偏高<sup>[33]</sup>, 而氮肥的过量使用又会增加农田 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[34]</sup>。因此, 合理减施氮肥, 无论从工业生产部门(如, 化肥生产企业)的碳排放还是氮肥施用后在田间的排放都会显著降低。本文对不同耕作措施下旱作冬小麦生产系统碳足迹进行分析, 数据表明, 秸秆覆盖免耕较其他两种耕作措施不仅可以减少土壤 N<sub>2</sub>O 的排放, 而且可以减少部分机械耕作燃油使用, 因此其总碳足迹最少。且秸秆覆盖免耕处理的单位小麦产量的碳足迹也较其他耕作方式低, 综合减排效果最好。这与伍芬琳等<sup>[35]</sup>的结果一致。此外, 免耕秸秆覆盖还有其他一些保水和改善土壤温度的作用<sup>[16]</sup>, 因此在轻质壤土旱作农田系统, 采取免耕秸秆覆盖是较好的低碳高效耕作管理模式。

### 4 结论

旱作农田碳足迹排放主要部分是农田 N<sub>2</sub>O 排放、氮肥生产造成的排放和柴油消耗排放, 半干旱半湿润地区旱作冬小麦生产中, 秸秆覆盖免耕耕作措施可以减少农田 N<sub>2</sub>O 排放量及机械耗油碳排放。在山西南部半干旱半湿润地区, 秸秆覆盖免耕可以提高旱作冬小麦产量, 单位小麦产量碳足迹均较其他耕作方式低, 综合减排效果最好。

### 参考文献 References

- [1] IPCC. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom/New York, USA: Cambridge University Press, 2013
- [2] Linquist B, van Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from

major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194–209

[3] Pielke R Jr, Wigley T, Green C. Dangerous assumptions[J]. *Nature*, 2008, 452(3): 531–532

[4] Gan Y T, Liang C, Hamel C, et al. Strategies for reducing the carbon footprint of field crops for semiarid areas: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(4): 643–656

[5] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋. 中国不同产业空间的碳排放强度与碳足迹分析[J]. *地理学报*, 2010, 65(9): 1048–1057  
Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y. Research on carbon emission intensity and carbon footprint of different industrial spaces in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1048–1057

[6] East A J. What is a carbon footprint? An overview of definitions and methodologies[C]//Vegetable industry carbon footprint scoping study-discussion papers and workshop. Sydney, Australia: Horticulture Australia Limited, 2008

[7] Weidema B P, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment?[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(1): 3–6

[8] Yang X L, Gao W S, Zhang M, et al. Reducing agricultural carbon footprint through diversified crop rotation systems in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 76: 131–139

[9] 徐小明. 基于非线性规划的冬小麦生产碳足迹优化研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2648–2654  
Xu X M. Carbon footprint optimization of winter wheat production based on nonlinear programming[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(8): 2648–2654

[10] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 240–247  
Zhang H H, Yan C R, Zhang Y Q, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(4): 240–247

[11] 张强, 巨晓棠, 张福锁. 应用修正的IPCC2006方法对中国农田N<sub>2</sub>O排放量重新估算[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(1): 7–13  
Zhang Q, Ju X T, Zhang F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 7–13

[12] 方诗标. 农业灌溉水利用效率影响因素研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013  
Fang S B. Research on the influencing factors of water efficiency of irrigation[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013

[13] 游来勇, 李冰, 王昌全, 等. 稻秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(12): 2394–2401  
You L Y, Li B, Wang C Q, et al. Effects of different amount of straw incorporation on grain yield, nitrogen uptake and use efficiency in wheat-rice rotation system[J]. *Journal of Nuclear*

Agricultural Sciences

[14] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 91(1/3): 217–232

[15] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 等. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应[J]. *生态学报*, 2003, 23(4): 787–796  
Yang J C, Han X G, Huang J H, et al. The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 787–796

[16] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应[J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 1176–1185  
Huang G B, Guo Q Y, Zhang R Z, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1176–1185

[17] Van Kessel C, Venterea R, Six J, et al. Climate, duration, and N placement determine N<sub>2</sub>O emissions in reduced tillage systems: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 33–44

[18] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 297–307  
Song L N, Zhang Y M, Hu C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of north China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297–307

[19] 阎翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(6): 704–715  
Yan C P, Zhang Y M, Hu C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 704–715

[20] 张进. 固定道保护性耕作的试验研究[J]. *山西农机*, 2002, 16(S1): 22–23  
Zhang J. The study of conservation tillage with fixed way[J]. *Shanxi Agricultural Machinery*, 2002, 16(S1): 22–23

[21] Brentrup F, Küsters J, Kuhlmann H, et al. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment methodology: I. Theoretical concept of a LCA method tailored to crop production[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3): 247–264

[22] 逯非, 王效科, 韩冰, 等. 中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(10): 2239–2250  
Lu F, Wang X K, Han B, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10): 2239–2250

[23] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(9): 93–98  
Shi L G, Chen F, Kong F L, et al. The carbon footprint of

winter wheat-summer maize cropping pattern on north China Plain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9): 93–98

[24] Flechard C R, Ambus P, Skiba U, et al. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 121(1/2): 135–152

[25] 李英臣, 侯翠翠, 李勇, 等. 免耕和秸秆覆盖对农田土壤温室气体排放的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(6): 1076–1083

Li Y C, Hou C C, Li Y, et al. Effects of no-till and straw mulch on greenhouse gas emission from farmland: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6): 1076–1083

[26] 夏文斌, 张旭辉, 刘铭龙, 等. 麦秆还田方式对旱地土壤综合温室效应的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 1010–1016

Xia W B, Zhang X H, Liu M L, et al. Effects of wheat straw return ways on integrated global warming effect from dryland soil in North China Plain[J]. *Soils*, 2014, 46(6): 1010–1016

[27] Ball B C, Crichton I, Horgan G W. Dynamics of upward and downward  $N_2O$  and  $CO_2$  fluxes in ploughed or no-tilled soils in relation to water-filled pore space, compaction and crop presence[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 20–30

[28] 汪婧, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体( $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ )通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(6): 1295–1300

Wang J, Cai L Q, Zhang R Z, et al. Effect of tillage pattern on soil greenhouse gases ( $CO_2$ ,  $CH_4$ , and  $N_2O$ ) fluxes in semi-arid temperate regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6): 1295–1300

[29] Almaraz J J, Zhou X M, Mabood F, et al. Greenhouse gas fluxes associated with soybean production under two tillage systems in southwestern Quebec[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(1): 134–139

[30] Mutegi J K, Munkholm L J, Petersen B M, et al. Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(10): 1701–1711

[31] Six J, Ogle S M, Breidt F J, et al. The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 155–160

[32] Rochette P. No-till only increases  $N_2O$  emissions in poorly-aerated soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 101(1/2): 97–100

[33] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687–694

Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687–694

[34] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米  $N_2O$  和  $CO_2$  排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381–4389

Li Y Q, Tang J W, Che S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of  $CO_2$  and  $N_2O$  from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381–4389

[35] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2035–2039

Wu F L, Li Lin, Zhang H L, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035–2039